

О ПЕРЕНОСЕ ПРИМЕСИ ФОСФОРА ИЗ СУБЛИМИРУЮЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА SiC В ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ СЛОЙ

Е.Н. М о х о в, В.А. Д и д и к, В.В. К о з л о в с к и й

Фосфор является донорной примесью в карбиде кремния [1]. Введение фосфора в SiC обычно осуществляется при росте эпитаксиальных слоев (ЭС) методами реактивного химического осаждения [2] или сублимации [3]. В работах [2, 3] определены растворимость фосфора в SiC ($C_p \approx (1-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), зависимость его содержания от температуры роста, ориентации подложки и упругости паров фосфора. Однако массоперенос фосфора непосредственно из сублимирующегося источника SiC в ЭС до сих пор не исследован. Нет также данных о влиянии на захват фосфора других примесей, находящихся в зоне роста. Это обстоятельство затрудняет получение ЭС $\text{SiC} \langle P \rangle$ с требуемым уровнем легирования, особенно, если рост ведется в присутствии других электрически активных примесей, в частности азота и алюминия, вводимых для создания приборных структур на основе SiC .

Целью настоящей работы является исследование массопереноса фосфора при сублимационном методе роста чистых и сильнолегированных ЭС SiC .

Изучение массопереноса фосфора при росте ЭС SiC проводилось сублимационным „сэндвич-методом“ [4] в вакууме или среде инертного газа аргона при температурах 1800–2100 °С. В ряде экспериментов в состав газовой фазы добавлялись примеси – азот, алюминий или фосфор. Скорость роста составляла 50–800 мкм/час. В качестве подложек использовались монокристаллы SiC , ориентированные гранями $\{0001\}$. Источниками паров SiC служили монокристаллы SiC , легированные фосфором. Диаметр источников и подложек составлял 10 мм, расстояние между ними (d) изменялось от 10 мкм до 0.5 см. Выращенные ЭС были монокристаллическими и имели плотность дислокаций 10^2 – 10^4 см^{-2} .

В работе [3] исследовались источники $\text{SiC} \langle P \rangle$, легированные фосфором при росте с концентрацией $C_p \approx (2-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Однако концентрация фосфора в ЭС SiC оказалась недостаточной для регистрации его нейтронно-активационным анализом.

Более успешным оказалось использование источников $\text{SiC} \langle P \rangle$ с фосфором, введенным методом трансмутационного легирования [5]. Для их получения исходные образцы SiC предварительно облучались альфа-частицами с энергией 16 и 20 МэВ. Атомы радиоактивного фосфора образовывались за счет ядерной реакции $^{29}\text{Si}(\alpha, n)^{32}\text{P}$. Толщина легированного слоя была порядка 100 мкм.

Зависимость коэффициента переноса фосфора (K_n) от условий роста ЭС *SiC*

$T_g, ^\circ\text{C}$	Атмосфера	Давление ммрт.ст.	Расстояние между источником и подложкой, мкм	Направление роста	K_n
1850	вакуум	10^{-4}	30	$[0001]C$	$3 \cdot 10^{-3}$
				$[0001]Si$	$2 \cdot 10^{-3}$
2100	Ar	760	20	$[0001]C$	$1.6 \cdot 10^{-2}$
				$[0001]Si$	$8 \cdot 10^{-3}$
2100	Ar + N ₂	760	20	$[0001]C$	$1 \cdot 10^{-2}$
		30 ⁺		$[0001]Si$	$1.8 \cdot 10^{-3}$
2100	Ar + Al	760	20	$[0001]C$	$2.2 \cdot 10^{-2}$
		20 ⁺		$[0001]Si$	$3.7 \cdot 10^{-2}$
2100	Ar + P	760	30	$[0001]C$	$< 1 \cdot 10^{-4}$
		100 ⁺		$[0001]Si$	$< 1 \cdot 10^{-4}$

+ - парциальное давление N₂, Al и P.

Максимальная концентрация введенного фосфора, измеренная по β -активности изотопа ^{32}P , составляла $\sim 10^{14}$ см⁻³. В качестве критерия эффективности массопереноса примеси от источника к подложке служил коэффициент переноса $K_n = Q_z / Q_s$, где Q_z , Q_s - количество примеси в подложке и источнике соответственно.

Основные экспериментальные данные, отражающие зависимость от условий роста и присутствия примесей азота и алюминия, отражены в таблице. Они сводятся к следующему.

1. При росте ЭС *SiC* не происходит полного переноса примеси фосфора от источника к подложке даже при минимальных зазорах ($\alpha = 10-20$ мкм). В отсутствие примесей в исследованном диапазоне температур $K_n \approx 10^{-2}-10^{-3}$. При одинаковых условиях роста более высокий уровень легирования имеют ЭС, выращенные в направлении $[0001]C$, что соответствует данным [2, 3].

2. При дополнительном введении в состав газовой фазы азота (N₂) происходит снижение K_n . Особенно это заметно при росте ЭС в направлении $[0001]Si$. При этом возрастает анизотропия легирования полярных $\{0001\}$ граней.

3. При переносе фосфора в среде, содержащей пары алюминия, наблюдается обратный эффект. K_n возрастает, причем наиболее существенно в направлении $[0001]Si$. Анизотропия легирования выражена сравнительно слабо.

4. Эффективность захвата фосфора из источника резко снижается в присутствии паров фосфора, введенных в газовую фазу. К

сожалению, чувствительность методики не позволяет точно определить в этом случае K_n , но он, по крайней мере на 1.5 порядка ниже, чем в чистой системе.

Согласно [6], при условии, что зазор между источником и подложкой $d \ll \lambda_0$ (λ_0 – длина свободного пробега молекул в газовой фазе); массоперенос примеси в „сэндвич-системе“ описывается уравнением

$$K_n = \alpha_i \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} (1 - \alpha_i^n) B^n \right], \quad (1)$$

где α_i – коэффициент конденсации (захвата) примесного атома при однократном столкновении, B – коэффициент, отражающий вероятность попадания испаренного атома из источника на поверхность подложки, зависящий только от размеров ячейки роста. При фиксированных размерах ячейки роста B может быть рассчитан [6].

Из формулы (1) можно определить α_i^P , который при температуре 1850 °C составляет $5 \cdot 10^{-4}$ и $2 \cdot 10^{-4}$ на гранях $(000\bar{1})C$ и $(0001)Si$ соответственно.

Из сравнения коэффициентов переноса фосфора и других примесей следует, что эффективность захвата фосфора в ЭС SiC относительно низка. Например, при 1850 °C для азота $\alpha_i \approx 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-2}$ [7], то есть на 3 порядка выше, чем для фосфора. Естественно, что это сильно затрудняет введение фосфора при росте слоев SiC .

Из полученных данных видно, что K_n сильно зависит от ориентации подложки. Подобный эффект наблюдался ранее и для переноса азота в ЭС SiC [7] и связывался с тем, что массоперенос примеси лимитируется кинетикой адсорбционно-десорбционных процессов, происходящих на растущей поверхности.

Энергия связи адатома фосфора при этом, вероятно, выше на грани $(000\bar{1})C$, чем на грани $(0001)Si$. Более низкая энергия связи адатомов фосфора на грани $(0001)Si$ ведет к тому, что именно на этой грани K_n наиболее сильно зависит от условий роста и, в частности, от примесного состава. Уменьшение K_n в среде N_2 логично связать с конкурентным характером адсорбции азота и фосфора. При рассмотрении переноса фосфора в присутствии паров алюминия следует также учесть вклад в массоперенос фосфора молекул AlP , которые могут более эффективно адсорбироваться на поверхности $(0001)Si$.

Снижение K_n при дополнительном введении паров фосфора можно объяснить тем, что с увеличением концентрации уменьшается эффективность адсорбции или, наоборот, возрастает доля десорбированных меченых атомов примеси. Так, химический состав паров, содержащих фосфор, поступающих из сублимирующегося источника SiC , за счет реакций в газовой фазе в атмосфере с повышенным содержанием фосфора, может изменяться с образованием слабо адсорбируемых состояний типа P_2 . Те же процессы, происходящие на поверхности в слое хемосорбата, при высокой концентрации фосфора активируют его десорбцию.

Заметим, что уменьшение K_{II} с ростом концентрации примеси наблюдалось ранее при массопереносе азота и бора в ЭС SiC [8] и фосфора в ЭС кремния [9].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] L i l o v S.K. // Cryst. Res. and Technol. 1982. V. 17. N 1. P. K17-20.
- [2] K i m H.J., D a v i s R.F. // J. Elektrochem. Soc. 1986. V. 133. N 11. P. 2350-2357.
- [3] М о х о в Е.Н., У с м а н о в а М.М., Ю л д а ш е в Г.Ф., М а х м у д о в Б.С. // Изв. АН СССР. Неорг. мат. 1981. Т. 17. № 2. С. 258-261.
- [4] V o d a k o v Yu. A., M o k h o v E.N., R a m m M.G. R o e n k o v A.D. // Krist und Techn. 1979. V. 14. N 6. P. 329-341.
- [5] Г о р н у ш к и н а Е.Д., Д и д и к В.А., К о з л о в - с к и й В.В., М а л о в и ч Р.Ш. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 11. С. 2044-2046.
- [6] Д о р ф м а н В.Ф. // Кристаллография. 1968. Т. 13. В. 1. С. 140-147.
- [7] М о х о в Е.Н., Р а м м М.Г., Р о е н к о в А.Д., Ф е д о - р о в М.И., В е р е н ч и к о в а Р.Г. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 14. С. 33-37.
- [8] V o d a k o v Yu. A., M o k h o v E.N., R a m m M.G. R o e n k o v A.D. // III Intern. Conf. on Amorf. and Crystall. SiC (ICACSC-90) Howard Univ. Washington D.C. 1990. Abstracts. P 7.
- [9] П о с т н и к о в В.В., К у з н е ц о в В.Н. // Кристалло- графия. 1975. Т. 20. В. 1. С. 127-130.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН,
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
12 февраля 1992 г.